

SUPERFÍCIE ESPECÍFICA DAS MATÉRIAS PRIMAS PARA A PELOTIZAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO *

José Murilo Mourão¹

Resumo

Para a pelletização de minério de ferro, as matérias primas devem ser moídas finamente. Sendo a moagem uma operação unitária de custo elevado, o controle de processo deve ser realizado com bastante cuidado, de forma que não seja nem excessiva, nem deficiente. A finura dos produtos moídos, minério e aditivos, é avaliada, através da medição de sua superfície específica, havendo diferentes métodos para a determinação desse parâmetro. Neste trabalho, faz-se uma análise desse tema, considerando-se os diferentes materiais utilizados na pelletização e seus valores característicos de superfície específica.

Palavras-chave: Pelotização; Superfície Específica; Minério de Ferro; Granulometria.

SURFACE AREA OF RAW MATERIALS FOR IRON ORE PELLETIZING

Abstract

For iron ore pelletizing, the raw materials need to be intensively ground. In view of the high operating cost, it is important to keep grinding under strict control to avoid either over or under-grinding. The fineness of the ground materials, iron ore and additives, is evaluated through the measurement of the surface area, which can be done using several methods. In this paper, this theme is discussed, considering the raw materials used in pelletizing and their typical values of surface area.

Keywords: Pelletizing; Surface Area; Iron Ore; Size Distribution.

¹ Engenheiro Metalurgista, graduado pela Escola de Minas de Ouro Preto; Consultor Independente no campo mínero-metalúrgico; Vitória, ES, Brasil; e-mail: jmurilo1953@gmail.com.

1. INTRODUÇÃO

Para a pelotização, minério de ferro e aditivos necessitam ser moídos a um ponto tal que possibilite a obtenção de pelotas cruas e queimadas com qualidade que atenda às exigências do processo e do mercado. A operação de moagem é uma das mais custosas da pelotização, demandando muita energia elétrica e materiais de consumo. Assim, estabelece-se um estrito controle dessa operação, de forma que não haja moagem deficiente dos materiais, com impacto negativo na qualidade das pelotas, nem excessiva, o que, por outro lado, aumenta o custo operacional.

Considerando-se os diferentes materiais das misturas de pelotização, minério de ferro, fundentes, aglomerantes e combustível sólido, que grau de moagem deve ser dado a cada um deles? Como avaliar o estado de finura desses materiais, para que se possa estabelecer o controle dos processos? Qual é o conceito de superfície específica?

No presente trabalho, este assunto é analisado, buscando-se encontrar respostas objetivas para as questões acima referidas.

2. ASPECTOS CONCEITUAIS RELATIVOS À SUPERFÍCIE ESPECÍFICA

A finura adequada das matérias primas para a pelotização só pode ser definida, através da execução de testes em escalas de laboratório e piloto. As melhores práticas operacionais indicam que, devido à grande diferença de densidade dos materiais, a moagem deve ser conduzida individualmente.

Considerando-se que o minério de ferro é o principal e maior constituinte de uma mistura a ser pelotizada, a definição da finura ótima concentra-se neste material. Nessa definição, dentre outros parâmetros, determina-se o tamanho médio das partículas do minério. Após a caracterização da finura ótima do minério de ferro, a boa prática considera que os demais aditivos sejam moídos, no mínimo, ao mesmo grau que o minério, ou seja, com o *mesmo tamanho médio das partículas*.

Cada minério de ferro tem suas próprias características, o que influencia seu comportamento nas operações unitárias de beneficiamento e na pelotização. Assim, cada tipo de minério tem sua finura ótima para a pelotização. Da literatura, é sabido que há vários métodos para se aferir a finura ou mesmo o estado de tamanho das partículas minerais. *Diferentes métodos conduzem a diferentes resultados*. No caso da pelotização, comumente, são realizados dois tipos de testes para essa avaliação:

- Determinação dos tamanhos maiores por peneiramento em peneiras de 100, 200 e 325 malhas, e da distribuição granulométrica completa, através de diferentes metodologias (sedimentação, ciclonação, raios laser, etc.);
- Medição de superfície específica, através de permeômetros ^(1, 2, 3).

Combinados, os resultados desses dois tipos de teste permitem estabelecer os parâmetros de controle da finura dos materiais, para o processo de pelotização.

A superfície específica (SE) foi assim designada por representar a relação entre a área da superfície externa das partículas (A) e a sua massa (M). Poderia, também,

ser referida ao volume, o que é menos comum. Assim, a equação que define a superfície específica de um material pulverulento é dada por:

$$SE = A/M, \text{ (normalmente expressa em cm}^2/\text{g, no sistema CGS).} \quad \text{Eq. 1}$$

A superfície específica, por ser um parâmetro de fácil e rápida determinação, tornou-se um dos mais importantes índices de controle da finura de materiais para a pelletização. Em especial, os métodos de medição desenvolvidos por Blane e Fisher ^(1, 2, 3), baseados na permeabilidade de um leito poroso de partículas à passagem do ar, prevalecem nas unidades industriais. Tais métodos não consideram o fator forma das partículas minerais, nem tampouco a rugosidade e porosidade, o que de certa forma implica em alguma imprecisão na medição.

Particularmente, Fisher, em seus estudos, considerou as partículas como esféricas. Constituiu leitos compactados em tubos cilíndricos e os submeteu à passagem de fluxos controlados de ar. Procedendo assim, estabeleceu condições padronizadas de teste em que foram verificadas correlações entre o diâmetro médio das partículas esféricas e a perda de carga do fluxo de ar, indicativa da permeabilidade do leito de partículas. O instrumento de medição ^(2, 3), desenvolvido por Fisher, tem como resultado o diâmetro médio (D_m) das partículas minerais.

Tendo-se o diâmetro (D_m), a massa específica do material considerado (μ) e tomando-se a forma esférica, conforme figura 1, pode-se calcular a equação geral da superfície específica, $SE = f(D_m, \mu)$.

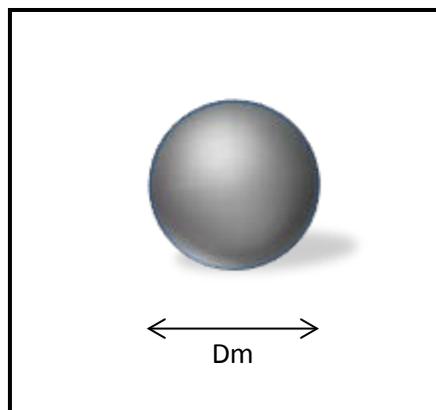


Figura 1 – Partícula esférica de diâmetro D_m

Da geometria, tem-se que:

$$\text{Área da calota esférica} = A = \pi \cdot D_m^2, \text{ e}$$

$$\text{Volume da esfera} = V = \pi \cdot D_m^3/6$$

Daí, pode se escrever que a massa da esfera é igual a:

$$M = \mu \cdot V = \mu \cdot \pi \cdot D_m^3/6$$

Da equação Eq. 1, a superfície específica é igual a:

$$SE = A/M = \pi \cdot D_m^2 / (\mu \cdot \pi \cdot D_m^3/6)$$

Simplificando esta equação, resulta:

$$SE = 6/(\mu \cdot D_m) \quad \text{Eq. 10.2}$$

Onde:

μ - massa específica verdadeira ou real, em g/cm^3 ,

D_m – diâmetro médio da partícula mineral em cm, e

SE – superfície específica em cm^2/g .

Como o instrumento de medição Fisher fornece o diâmetro médio das partículas em micron (10^{-4} cm), pode-se ajustar a equação Eq. 2 para a seguinte forma geral:

$$SE = 60000/(\mu \cdot D_m) \quad \text{Eq. 3}$$

Sendo que:

μ - massa específica verdadeira ou real do material em g/cm^3 ,

D_m – diâmetro médio da partícula mineral em micron, e

SE – superfície específica em cm^2/g .

Considerando-se que na pelotização tem-se uma mistura de minério de ferro com fundentes, aglomerante e, por vezes, combustível sólido, poderiam ser traçadas curvas de superfície específica em função do diâmetro médio de partículas, para esses diferentes materiais. Com essas curvas, poderiam ser definidas as superfícies específicas desses aditivos, de forma que o diâmetro médio de suas partículas fosse o mesmo daquele do minério de ferro.

Apenas para exemplificar, sejam consideradas as massas específicas do minério de ferro hematítico, do calcário calcítico e do antracito, respectivamente: 5,0; 2,1 e 1,5. Levando-se tais valores na equação geral Eq. 3, resultam as três equações seguintes para esses materiais:

$$SE = 12000/D_m, \text{ relativa ao minério de ferro,} \quad \text{Eq. 4}$$

$$SE = 28571/D_m, \text{ relativa ao calcário calcítico e} \quad \text{Eq. 5}$$

$$SE = 40000/D_m, \text{ correspondente ao antracito.} \quad \text{Eq. 6}$$

A figura 2 mostra a representação gráfica da Superfície Específica em função do diâmetro médio das partículas, para esses três materiais, minério de ferro, calcário e antracito. Observando-se essa figura, pode-se constatar facilmente que:

- Quanto menor é o diâmetro médio das partículas minerais, maior é o valor da superfície específica, independentemente do material que se considere.
- Para o mesmo diâmetro médio, o valor da superfície específica é maior para os materiais de menor massa específica.

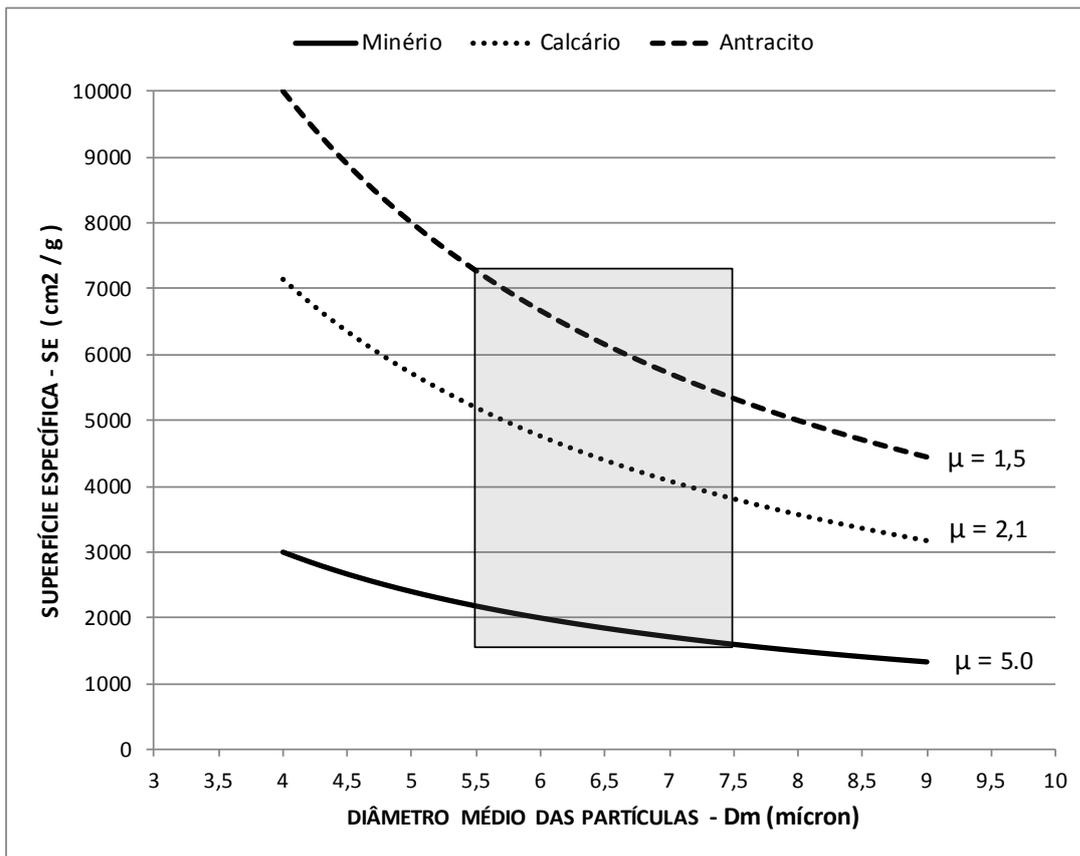


Figura 2 – Superfície específica em função do diâmetro médio das partículas

3. SUPERFÍCIE ESPECÍFICA E RESISTÊNCIA DAS PELOTAS CRUAS

A resistência das pelotas cruas, formadas nos discos e tambores de pelotização, depende do tamanho das partículas minerais utilizadas na sua composição. Assim, essa resistência depende não só do estado de tamanho das partículas de minério de ferro, mas também dos aditivos.

Segundo Rumpf^(5,6), a resistência da pelota crua é dada pela seguinte expressão:

$$\sigma = k' \cdot [(1-\epsilon)/\epsilon] \cdot Y \cdot (1/Dm) \cdot \cos\phi_{(L-S)} \quad \text{Eq. 7}$$

Em que:

σ - tensão de ruptura da pelota crua,

k' – constante que depende do minério, do líquido, etc.,

ϵ - porosidade da pelota crua (fracionária),
 Y – tensão superficial do líquido,
 D_m – diâmetro médio das partículas minerais,
 $\cos\varphi_{(L-S)}$ – ângulo de contato líquido-sólido.

Através dos estudos desenvolvidos por Rumpf, pode-se verificar que a resistência da pelota crua (σ) *aumenta* com a *diminuição* do *tamanho médio das partículas minerais* e da porosidade. Por outro lado, aumenta com a tensão superficial do líquido e com a redução do ângulo de contato líquido-sólido (φ), ou o mesmo que com o aumento da molhabilidade ou hidrofiliicidade das partículas minerais.

Neste último aspecto, é importante destacar que o pelotamento só ocorre quando a água molha as partículas minerais que devem ter o caráter hidrofílico ($\varphi = 0^\circ$). Nesta condição, desenvolvem-se as forças capilares de coesão, principais responsáveis pela formação das pelotas cruas. Como o minério de ferro chega ao pelotamento, proveniente de outras operações de beneficiamento, tais como concentração e desaguamento, onde aditivos químicos são utilizados, é importante verificar se a hidrofiliicidade das partículas minerais não foi descaracterizada. Normalmente, as aminas, utilizadas na concentração do minério de ferro para a flutuação da sílica, e os aditivos usados em operações de filtração, residuais e diluídos na umidade do minério, podem alterar a hidrofiliicidade e, portanto, a pelotabilidade (ballability) do material.

Tomando-se a expressão da Superfície Específica da equação Eq. 3, vem:

$SE = 60000/(\mu \cdot D_m)$, ou o mesmo que:

$SE = k''/(\mu \cdot D_m)$. Daqui, resulta:

$D_m = k''/(\mu \cdot SE)$

Levando-se D_m na expressão de Rumpf da equação Eq. 7 resulta:

$\sigma = k' \cdot [(1-\epsilon)/\epsilon] \cdot Y \cdot (1/D_m) \cdot \cos\varphi_{(L-S)}$ ou $\sigma = k' \cdot [(1-\epsilon)/\epsilon] \cdot Y \cdot (\mu \cdot SE/k'') \cdot \cos\varphi_{(L-S)}$

Simplificando, tem-se a expressão genérica da resistência da pelota crua:

$$\sigma = k \cdot SE \cdot \mu \cdot Y \cdot \cos\varphi_{(L-S)} \cdot (1-\epsilon)/\epsilon \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

σ - tensão de ruptura da pelota crua,
 k – constante que depende do minério, do líquido, etc.,
 SE – superfície específica da mistura pelotizada,
 μ - massa específica verdadeira ou real das partículas da mistura,
 Y – tensão superficial do líquido,
 $\cos\varphi_{(L-S)}$ – ângulo de contato líquido-sólido,
 ϵ - porosidade da pelota crua (fracionária).

Assim, verifica-se que a Resistência da Pelota crua (σ) aumenta com o crescimento da Superfície Específica (SE) da mistura de minerais pelletizados. Maior tensão de ruptura da pelota crua significa maior resistência à deformação e à desintegração em operações de manuseio e transporte, vigentes nos processos industriais. A boa qualidade da pelota crua permite uma operação estável do forno de pelletização e, por conseguinte, a produção de pelotas queimadas com mais alto padrão de qualidade.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO

A superfície específica ótima para a pelletização depende do tipo de minério e das especificações de qualidade das pelotas queimadas. Quando se considera um novo tipo de minério, a finura ótima (superfície específica) é definida, através da execução de exaustivos testes de moagem e pelletização, em escalas de laboratório e planta piloto. Na definição desse ponto, há de se analisar cuidadosamente os aspectos técnicos e econômicos, pois uma finura deficiente leva a uma qualidade ruim das pelotas cruas, e em excesso a um maior custo operacional de moagem.

Nas diversas plantas industriais, verifica-se que esse parâmetro varia numa faixa bastante ampla, tal como: 1600 a 2200 cm²/g. Desse modo, o diâmetro médio das partículas de minério moído e pronto para o pelletamento tem uma variação correspondente, situando-se na faixa de 5,5 a 7,5 micra, valores estes facilmente calculados pela equação Eq. 4.

Tendo-se em conta as melhores práticas industriais, os aditivos devem ser moídos em separado e, no mínimo, ao mesmo tamanho médio das partículas do minério de ferro. Sendo assim, através do gráfico da figura 2, pode-se verificar que o *calcário* e o *antracito* necessitam ser preparados e moídos com superfície específica nas faixas aproximadas de 4000 a 5000 cm²/g e 5000 a 7000 cm²/g, respectivamente. O campo indicativo dessas faixas de variação, correspondentes ao minério de ferro, calcário e antracito, está indicado pela área sombreada na figura 2.

Por outro lado, alguns pesquisadores e estudiosos do tema pelletização preferem referenciar o cálculo da superfície específica à unidade de volume e não à de peso, como foi desenvolvido até aqui. A justificativa é que, procedendo-se desta forma, tem-se uma noção mais exata do estado de finura entre materiais de massas específicas muito diferentes. Dentro deste conceito, a definição de superfície específica (SE') passaria a ser a "relação entre a área da superfície externa das partículas (A) e o seu volume (V)".

$$SE' = A / V \text{ (normalmente expressa em cm}^2\text{/cm}^3\text{, no sistema CGS)} \quad \text{Eq. 9}$$

De forma similar aos cálculos anteriores, em que as partículas foram consideradas como esféricas (figura 1), tem-se da geometria:

$$\begin{aligned} \text{Área da calota esférica} &= A = \pi \cdot Dm^2, \text{ e} \\ \text{Volume da esfera} &= V = \pi \cdot Dm^3/6 \end{aligned}$$

Substituindo-se as expressões de A e V na equação Eq. 9, resulta:

$$SE' = \pi \cdot Dm^2 / (\pi \cdot Dm^3/6)$$

Simplificando, vem:
 $SE' = 6/Dm$

Como o instrumento de medição do diâmetro médio fornece o valor em micron (10^{-4} cm), deve-se ajustar esta última equação, para se ter o resultado no sistema CGS, resultando:

$$SE' = 60000/Dm \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

SE' – superfície específica, em cm^2/cm^3 ,
 Dm – diâmetro médio das partículas minerais, em micron.

Nesta concepção, verifica-se que o cálculo do valor da superfície específica (SE') independe do valor da massa específica do material. Devido a este fato, quando se constroem curvas $SE' = f(Dm)$ para diferentes materiais, elas são coincidentes numa única. A figura 3, elaborada para minério de ferro, calcário e antracito, evidencia este fato, em contraste com a figura 2.

Isso parece fazer muito mais sentido que o cálculo referenciado à massa, em cm^2/g , pois diferentes materiais, com partículas de mesmo diâmetro médio, apresentam o mesmo valor de superfície específica, quando expresso em cm^2/cm^3 .

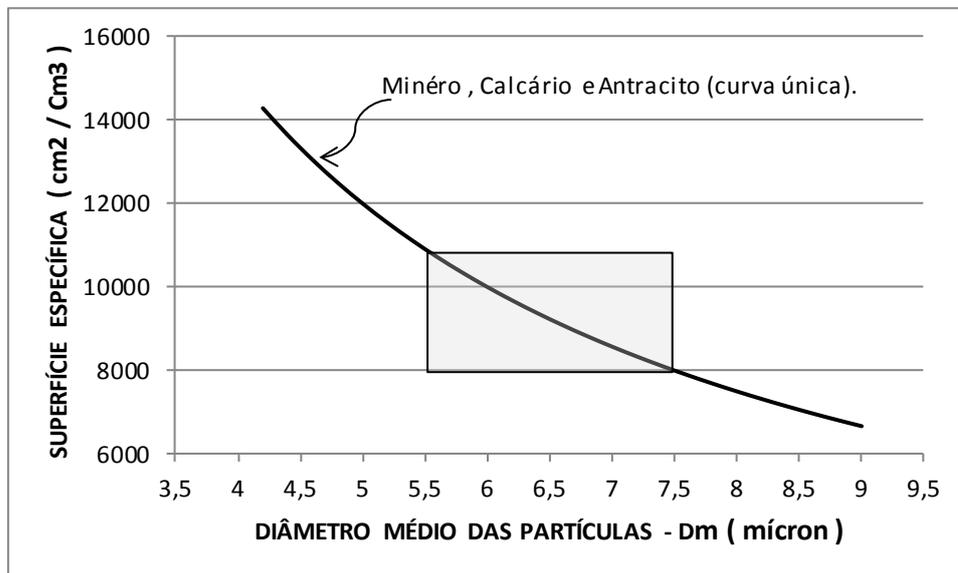


Figura 3 – Superfície Específica em cm^2/cm^3 versus diâmetro médio das partículas minerais, mostrando a independência do tipo de material.

A superfície específica referenciada ao volume (SE') pode ser calculada, conhecendo-se o valor da superfície específica relacionada à massa (SE) e vice-versa. Para tal, é

necessário conhecer a massa específica real (μ) do material considerado. Assim, sejam tomadas as equações Eq. 3 e Eq. 10:

$$SE = 60000/(\mu.Dm), \text{ e}$$
$$SE' = 60000/Dm$$

Da primeira equação, pode se escrever que:

$Dm = 60000/(\mu.SE)$. Daí,
levando a SE' e simplificando, resulta:

$$SE' = SE. \mu \quad \text{Eq. 11}$$

Onde: SE' – superfície específica, em cm^2/cm^3 ,
 SE – superfície específica, em cm^2/g , e
 μ - massa específica real das partículas da mistura, em g/cm^3 .

Considerando-se a Eq. 11 e as massas específicas do minério de ferro, calcário e antracito como sendo 5,0; 2,1; e 1,5 g/cm^3 , respectivamente, pode-se escrever que:

$$SE' = (5,0).SE, \text{ relativa ao minério de ferro,} \quad \text{Eq. 12}$$

$$SE' = (2,1).SE, \text{ relativa ao calcário calcítico, e} \quad \text{Eq. 13}$$

$$SE' = (1,5).SE, \text{ correspondente ao antracito.} \quad \text{Eq. 14}$$

Com estas equações, pode ser construído o gráfico da figura 4, seguinte, mostrando a relação $SE' = f(SE)$, para os materiais considerados. Constata-se facilmente que, para um mesmo valor de SE' (cm^2/cm^3), ou seja, para um mesmo diâmetro médio de partículas, os valores de SE (cm^2/g) são muito diferentes, para o minério de ferro, calcário e antracito.

Para referência, foi indicada a área sombreada nessa figura, abrangendo a faixa de variação de superfície (SE) do minério de ferro em plantas industriais, qual seja: 1600 a 2200 cm^2/g ou o mesmo que 8000 a 11000 cm^2/cm^3 . Daí, podem ser feitas as correspondências de valores com as curvas do calcário e do antracito.

Na pelotização, são dosados ao minério fundentes e outros materiais (combustível sólido, por exemplo) em diferentes proporções, dependendo do tipo de pelota que se considere. A boa prática industrial sugere que estes aditivos sejam moídos em um estado tal que o diâmetro médio das partículas esteja próximo daquele definido para as partículas do minério de ferro. Assim, seria o mesmo que dizer:

“Na pelotização, a superfície específica, expressa em cm^2/cm^3 , deve ter o mesmo valor para o minério de ferro e aditivos.”

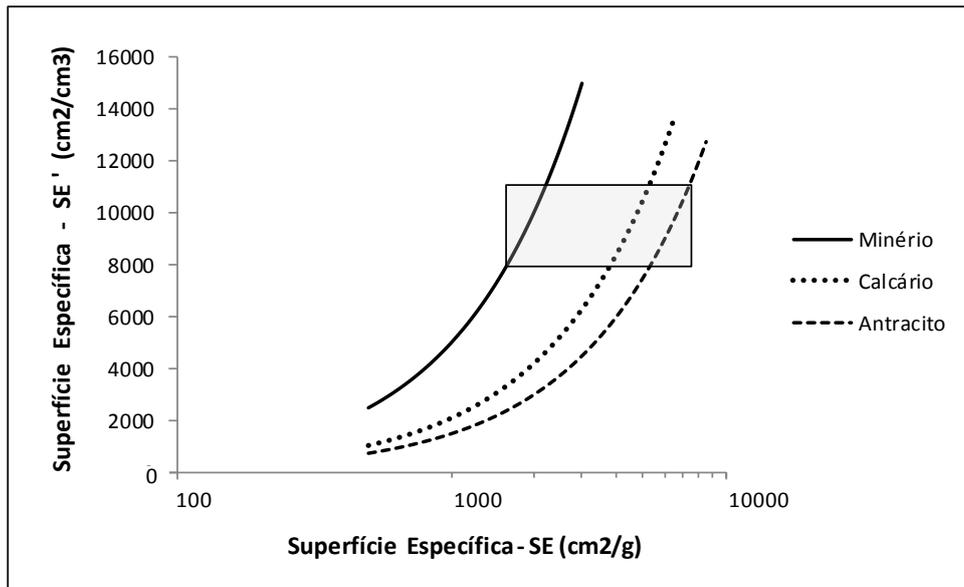


Figura 10.4 – Superfícies específicas referenciadas à massa e ao volume, para diferentes materiais, componentes da mistura de pelletização.

A grande maioria dos institutos de pesquisa, universidades e plantas industriais de pelletização adota o conceito de superfície específica referenciada à massa das partículas minerais (cm²/g). Não está claro o porquê desta escolha! Provavelmente, os primeiros cientistas que estudaram o assunto consideraram essa referência, o que se propagou no meio técnico. Porém, como visto, o conceito baseado no volume permite uma noção imediata do estado de tamanho (D_m) relativo dos diferentes materiais que compõem uma mistura de pelletização.

4. CONCLUSÃO

Na pelletização, minério de ferro e aditivos (fundentes, combustível sólido, etc.) devem ser moídos separadamente, em vista da grande diferença de densidades. Na definição da finura ótima dessas matérias primas, os testes em escalas de laboratório e piloto são fundamentais. A moagem deficiente leva à má qualidade das pelotas, e excessiva a maior custo operacional.

A superfície específica tem sido utilizada como grandeza para a avaliação da finura dos materiais utilizados na pelletização de minérios de ferro. Pode ser medida em relação à massa (cm²/g), ou ao volume real (cm²/cm³), o que resulta em números bem distintos.

A experiência industrial tem mostrado que minério de ferro e aditivos devem ser moídos ao mesmo tamanho médio das partículas. Nesta condição, as superfícies específicas dos diferentes materiais apresentam o mesmo valor, quando referenciadas ao volume, ou seja, quando expressas em cm²/cm³. Embora esta prática seja pouco utilizada nos meios técnicos, ela parece ser a mais indicada para se ter uma noção mais exata do tamanho relativo das partículas das diferentes matérias primas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ASTM C 204 – 07: Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus. (<http://www.astm.org/Standards/C204.htm>).
- 2 Aim Sizer Scientific Ltd. - Fisher Sub Sieve Sizer – Average Particle Size Analysis. (http://www.aimsizer.com/particle_size_analyzer_fisher_sub_sieve_sizer_0.2um_50um.html).
- 3 Catalogue of Sub-sieve Autosizer (SAS) - Hel Group Ltd, UK. (http://www.micromeritics.com/repository/files/SAS_flyer.pdf).
- 4 Rumpf, H. - Strength of granules and agglomerates, 1st International Symposium on Agglomeration, Philadelphia, USA, 1962. (<http://agglomeration.org/agglomeration-books/>).
- 5 Forsmo, S. - Influence of Green Pellet Properties on Pelletizing of Magnetite Iron Ore; Doctoral Thesis presented at Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2007. (<http://epubl.ltu.se/1402-1544/2007/14/LTU-DT-0714-SE.pdf>).
- 6 Yuan, Y. and Randall Lee, T. – Contact Angle and Wetting Properties, Department of Chemistry, University of Houston, Houston, Texas, USA. (Yuan's e-mail: yyuan2@uh.edu and Lee's e-mail: trlee@uh.edu).